

잔여 파동장 분리 기법을 이용한 주파수영역 파형역산

손우현¹ · 편석준^{2*} · 곽상민¹

¹서울대학교 에너지시스템공학부

²인하대학교 에너지자원공학과

Frequency-domain Waveform Inversion using Residual-selection Strategy

Woohyun Son¹, Sukjoon Pyun^{2*}, and Sangmin Kwak¹

¹Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

²Department of Energy Resources Engineering, Inha University

요약: 본 논문에서는 시간영역에서 분리된 잔여 파동장을 이용하여 주파수영역 파형역산을 수행하였다. 시간영역 잔여 파동장들을 절대값의 크기에 따라 정렬하여 분류하고, 이를 여러 개의 그룹으로 분리하였다. 분리된 잔여 파동장들은 각 그룹별로 목적함수의 경사 방향을 정규화한 후 평균하기 때문에 통상적인 잔여 파동장에서 작은 크기를 가지는 파동장들을 상대적으로 강조하는 효과가 있고, 이는 파형역산 시 심부구조의 이미지 향상에 도움을 준다. 파형역산은 시간영역에서 분리된 잔여 파동장을 이용하여 주파수영역에서 수행되며, 목적함수의 경사방향은 구조보정에서 많이 쓰이는 역전파 기법을 적용하여 계산된다. 본 연구에서 제안한 알고리즘의 타당성을 확인하기 위하여 SEG/EAGE 압염 모델과 Marmousi 모델을 이용하여 파형역산을 수행하였다. 역산 결과를 통해 제안된 알고리즘이 일반적인 주파수영역 파형역산에 비해 심부구조에 대하여 향상된 결과를 제시함을 확인하였다.

주요어: 파형역산, 주파수영역, 잔여 파동장

Abstract: We perform the frequency-domain waveform inversion based on the residual-selection strategy. In the residual-selection strategy, we classify time-domain residual wavefields into several groups according to the order of absolute amplitudes. Because the residual wavefields are normalized after regularization of the gradient directions within each group, the residual-selection strategy plays a role in enhancing the small-amplitude wavefields, which contributes to improving the deep parts of inverted subsurface images. After classifying residuals in the time domain, they are transformed to the frequency domain. Waveform inversion is performed in the frequency domain using the back-propagation technique which has been popularly used in reverse-time migration. The residual-selection strategy is applied to the SEG/EAGE salt and IFP Marmousi models. Numerical results show that the residual-selection strategy yields better results than the conventional frequency-domain waveform inversion.

Keywords: waveform inversion, frequency-domain, residual wavefields

서 론

지난 30년간 정확한 지하구조 영상을 얻기 위해 탄성과 자료를 이용한 완전 파형역산이 많은 연구자들에 의해 수행되었다. 완전 파형역산은 방대한 계산자원을 필요로 하기 때문에 Tarantola (1984)는 행렬의 대칭성을 이용한 그레디언트 법에 기반한 알고리즘을 제안하였다. 그러나 파형역산은 국부 최소값, 잡음, 층간 속도 차이가 큰 모델의 역산 등 극복해야 할 여

러 문제점들이 존재한다. 이러한 문제점들을 완화시키거나 해결하기 위해 다중 격자 역산(Bunks *et al.*, 1995), 정확한 초기 모델 구축(Brenders and Pratt, 2007; Ravaut *et al.*, 2004), 견고한 오차법(robust criteria)에 대한 연구(Crase *et al.*, 1990; Djikpesse and Tarantola, 1999; Shin *et al.*, 2007) 등이 수행되었다. 본 연구에서는 이러한 문제점들 중 압염층을 포함하는 복잡한 모델의 심부 속도구조를 역산하는 어려움을 해결하는데 초점을 두었다.

일반적인 주파수영역 파형역산에서의 단점은 관측 자료와의 비교를 위한 파동장의 모델링을 주파수영역 모델링 알고리즘을 통해 수행한다는 점이다. 이 경우 파형역산을 위한 전처리 등은 주파수영역에서만 이루어지기 때문에 시간영역 트레이스를 이용한 자료처리가 어렵거나 계산비용이 증가하게 된다. 따

2011년 6월 22일 접수; 2011년 7월 12일 수정; 2011년 7월 14일 채택
*Corresponding author

E-mail: pyunsj@inha.ac.kr

Address: Department of Energy Resources Engineering, Inha university,
253 Yonghyun-dong, Nam-gu, Incheon 402-751, Korea

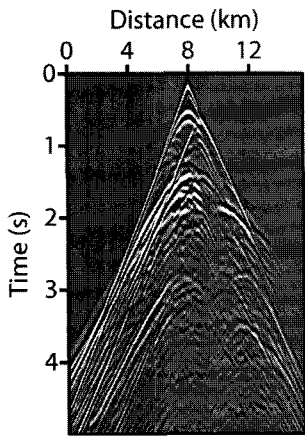


Fig. 1. A common shot gather obtained by the finite-difference method.

라서, 일반적으로는 주파수영역에서 가능한 방법으로 복소각 주파수를 이용한 시간에 따른 감쇠효과(Brossier *et al.*, 2009) 나 경사방향에 대한 공간적인 필터링(Sirgue and Pratt, 2003) 등에 국한될 수밖에 없다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완할 수 있는 방법으로 시간영역에서의 전처리 과정을 도입하고자 한다. 먼저, 주파수영역에서 파동장을 모델링하고 시간영역으로 변환한 후, 시간영역에서 잔여 파동장을 생성하고 진폭에 따라 잔여 파동장을 몇 개의 그룹으로 분리하였다. 이렇게 분리된 잔여 파동장들을 다시 주파수영역으로 변환하여 주파수영역 파형역산을 수행하였다. 잔여 파동장 분리 기법을 이용한 경사 방향(gradient direction)과 통상적인 경사 방향을 비교함으로써 제안한 기법의 효과를 시각적으로 확인할 수 있다. 제안한 방법의 유효성을 검증하기 위해 SEG/EAGE 압염 모델(Aminzadeh *et al.*, 1994)과 Marmousi 모델(Versteeg, 1994)에 대한 파형역산을 수행한다. 통상적인 주파수영역 파형역산 기법을 통해 얻은 역산 결과와의 비교를 통해 시간영역 잔여 파동장의 전처리 기법에 대한 효용성을 확인한다.

잔여 파동장 분리 기법

잔여 파동장 분리 기법을 주파수영역 파형역산에 적용하기 앞서 시간영역에서 분리된 잔여 파동장들을 생성한다. 통상적인 시간영역의 잔여 파동장은 다음과 같이 정의된다.

$$r_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{u}_{ij}(\omega) e^{i\omega t} d\omega - d_{ij}(t), \quad (1)$$

여기서 i 는 송신원 번호, j 는 수신기 번호, $r_{ij}(t)$ 는 시간영역의 잔여 파동장, $\tilde{u}_{ij}(\omega)$ 는 주파수영역의 모델링 파동장, ω 는 각주파수, $d_{ij}(t)$ 는 관측 파동장이다. Fig. 1은 SEG/EAGE 압염 모델(Fig. 7a)에 대해 유한차분 모델링을 적용하여 얻은 공통 송신원 모음을 나타낸다. 식 (1)을 이용하여 잔여 파동장의 탄성파기록을 얻고 그 형태를 분석하였다. Fig. 3(a)는 송신원이 8.0 km 지점에 위치할 때 얻은 잔여 파동장의 탄성파기록이다.

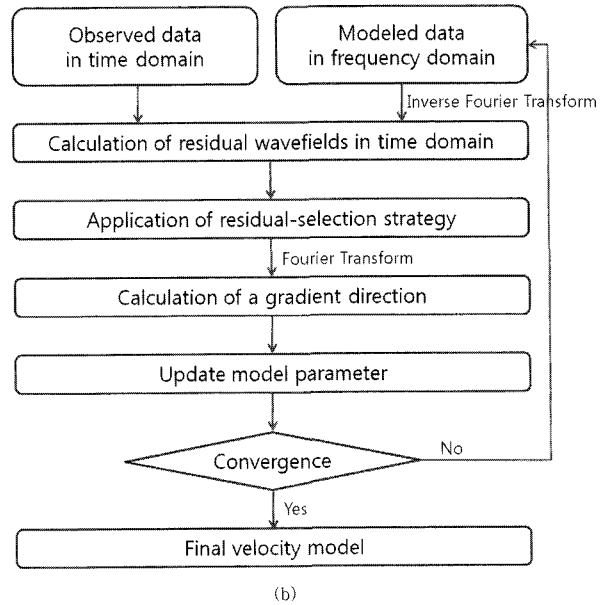
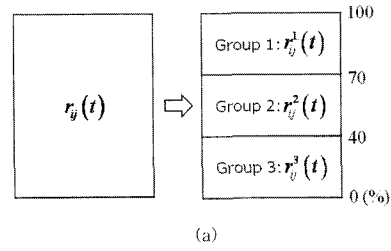


Fig. 2. (a) Residual-selection strategy and (b) the flowchart of proposed waveform inversion algorithm.

잔여 파동장 분리 기법을 통해 이 잔여 파동장을 절대값의 크기에 따라 정렬하여 분류하고, 이들을 세 개의 그룹으로 분리하였다(Fig. 2a). 그룹 1은 통상적인 잔여 파동장 중에서 70 ~ 100%의 크기에 해당하는 잔여 파동장이고, 그룹 2는 40 ~ 70%, 그룹 3은 0 ~ 40%에 해당하는 잔여 파동장이다. Fig. 3(b)~(d)는 기존의 잔여 파동장인 Fig. 3(a)를 Fig. 2(a)의 분류 기준에 따라 분리하여 얻어진 잔여 파동장들을 나타낸다.

잔여 파동장의 특성을 분석하기 위해 Fig. 3의 잔여 파동장들로부터 얻은 트레이스를 비교하였다(Figs. 4a, 4b). Fig. 4(a)의 트레이스는 Fig. 4(b)에 도시된 세 개의 그룹의 트레이스로 분리된다. 잔여 파동장 분리 기법의 중요한 효과는 진폭 스펙트럼에서 관찰된다(Figs. 5a, 5b). 분리되기 이전의 트레이스로부터 얻은 진폭 스펙트럼은 약 2 Hz 이하에서 낮은 에너지를 갖는 것으로 관찰된다(Fig. 5a). 하지만 잔여 파동장 분리 기법은 Fig. 5(b)와 같이 잔여 파동장의 진폭 스펙트럼을 그룹별로 정규화하는 효과가 있음을 확인할 수 있다.

잔여 파동장 분리 기법을 이용한 파형역산

본 연구에서 제안한 알고리즘은 l_1 -노름(norm) 목적함수를 이용한 주파수영역 파형역산(Pyun *et al.*, 2009)에 기반한다.

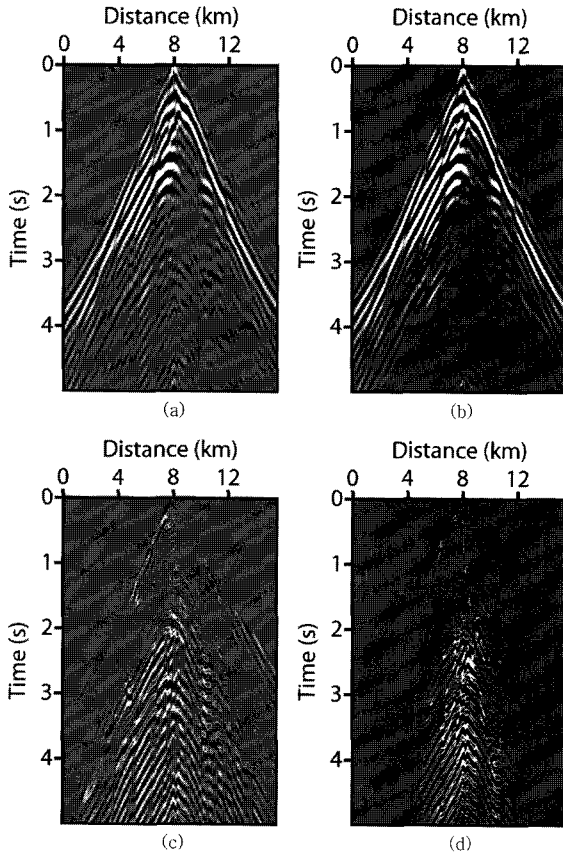


Fig. 3. (a) The conventional residual wavefields; and the separated residual wavefields for (b) Group 1, (c) Group 2, and (d) Group 3 in Figure 2.

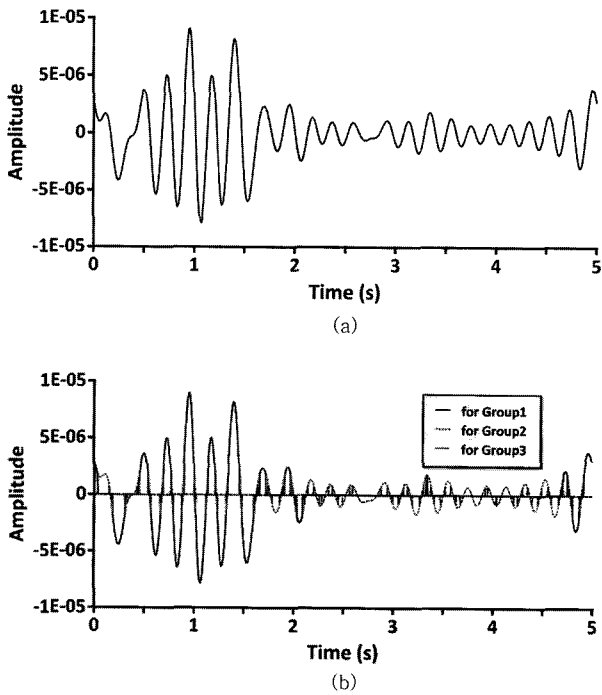


Fig. 4. Traces extracted from the residual wavefields shown in (a) Fig. 3a and (b) Figs. 3b, 3c, and 3d.

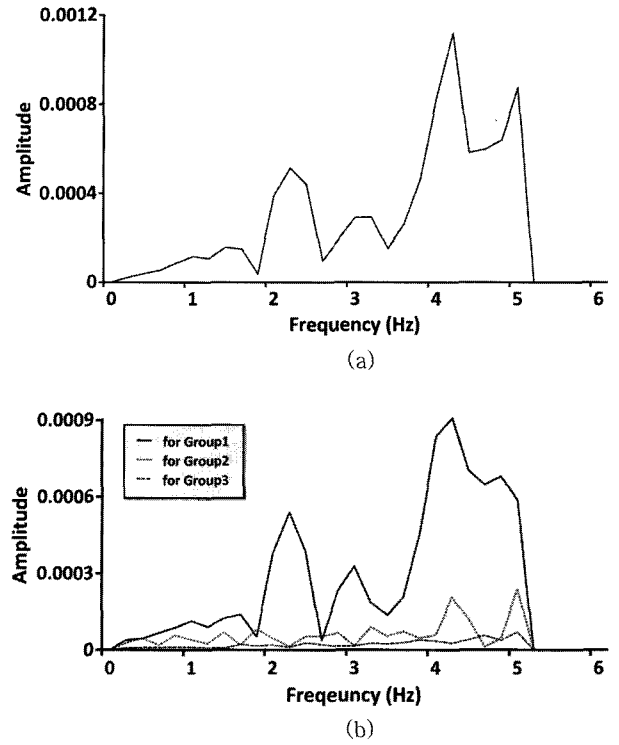


Fig. 5. Amplitude spectra for traces displayed in (a) Fig. 4a, and (b) Fig. 4b.

식 (2)를 이용하여 분리된 시간영역의 잔여 파동장을 푸리에 변환(Fourier transform)하여 주파수영역의 잔여 파동장을 얻었다.

$$\tilde{r}_{ij}^g = \int_{-\infty}^{\infty} r_{ij}^g(t) e^{-i\omega t} dt \quad (g=1, 2, 3), \quad (2)$$

여기서 g 는 그룹 번호, \tilde{r}_{ij}^g 는 분리된 주파수영역의 잔여 파동장, $r_{ij}^g(t)$ 는 분리된 시간영역의 잔여 파동장이다. 주파수영역에서 l_1 -노름을 이용한 목적함수는 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_r} \{ |\text{Re}(\tilde{r}_{ij}^g)| + |\text{Im}(\tilde{r}_{ij}^g)| \}, \quad (3)$$

여기서 n_s 와 n_r 는 각각 송신원과 수신기의 개수이다. 파형역산을 위해 역전파 기법(Pratt *et al.*, 1998)을 사용하여 Fig. 2(a)와 같이 세 개의 그룹에 대한 각각의 경사 방향을 계산하고, 이들을 평균함으로써 최종의 경사 방향을 Fig. 6(b)와 같이 얻었다. Fig. 6(a)는 통상적인 방법으로 얻어진 경사 방향을 도시한 것이며, 이는 모델의 심부에서 Fig. 6(b)와 상당히 다른 양상을 보인다. Fig. 6(a)~(b)를 통해 잔여 파동장 분리 기법은 통상적인 방법과 달리 압력 하부의 속도 업데이트에 좀 더 민감하게 반응할 수 있음을 확인하였다. 유사-헤시안(pseudo-Hessian) 행렬의 대각성분을 이용하여 경사 방향을 정규화하고, 속도 모델을 반복적으로 업데이트 하였다(Shin *et al.*, 2001). 본 연구에서 제안한 잔여 파동장 분리기법을 이용한 파형역산의 전체적인 과정을 Fig. 2(b)에 도시하였다.

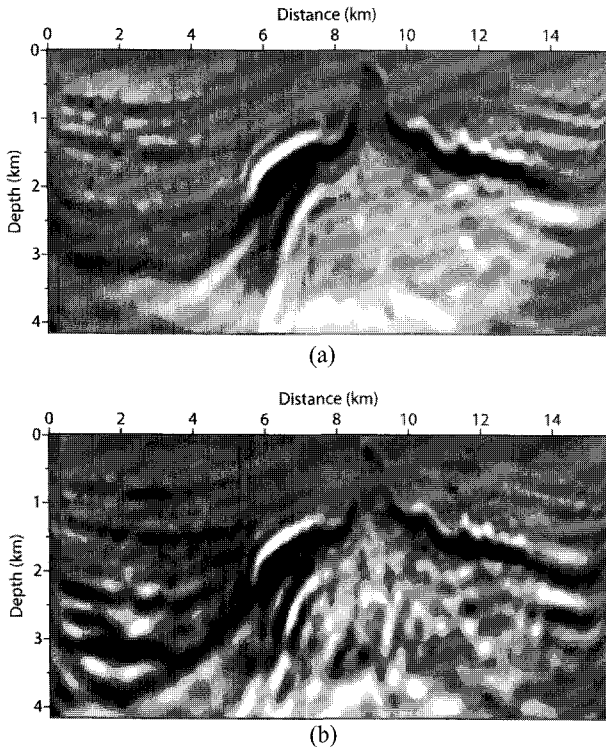


Fig. 6. The gradient directions at the 2nd iteration using (a) the conventional approach and (b) the residual-selection strategy.

수치 예제

잔여 파동장 분리 기법을 이용한 역산의 효과를 확인하기 위해 SEG/EAGE 암염 모델(Aminzadeh *et al.*, 1994)에 대한 수치실험을 수행하였다. 수치실험에 사용한 인공합성 관측자료는 시간영역 유한차분 모델링 기법을 통해 얻었다. 송신원 파형으로는 일차미분 가우스 함수(Gaussian function)를 사용하였고, 최대 주파수는 20 Hz이다. 파형역산을 위해 인공합성 자료에 고주파 차단 필터(high-cut filter)를 적용하여 최대 주파수가 5 Hz가 되도록 하였다. 초기 속도 모델은 심도가 증가함에 따라 속도가 1.679 km/s 부터 4.45 km/s 까지 선형적으로 증가하는 모델을 사용하였다. 파형역산 알고리즘은 주파수영역 유한요소 모델링 기법에 기반하여 구성하였다. 먼저, 본 연구에서 제안한 잔여 파동장 분리 기법을 적용하기 위해서는 주파수영역에서 생성된 모델링 파동장을 시간영역으로 변환한다. 다음으로 시간영역 잔여 파동장을 “잔여 파동장 분리 기법”장에서 언급한 규칙대로 그룹별로 분리한다. 분리된 시간영역 잔여 파동장들은 다시 주파수영역으로 변환하고, 이를 파형역산을 위한 경사 방향을 계산하는 데에 사용하였다. Fig. 7(b)는 분리된 잔여 파동장을 이용하여 역산된 속도모델을 나타낸다. 암염구조가 모델의 심부까지 잘 영상화되었으며, 타원으로 표시된 암염 하부의 저속도 영역 역시 뚜렷하게 역산되었다. 통상적인 파형역산 방법과의 비교를 위해 일반적인 잔여 파동장을 사용하는 주파수영역 파형역산을 수행하였다. Fig. 7(c)는

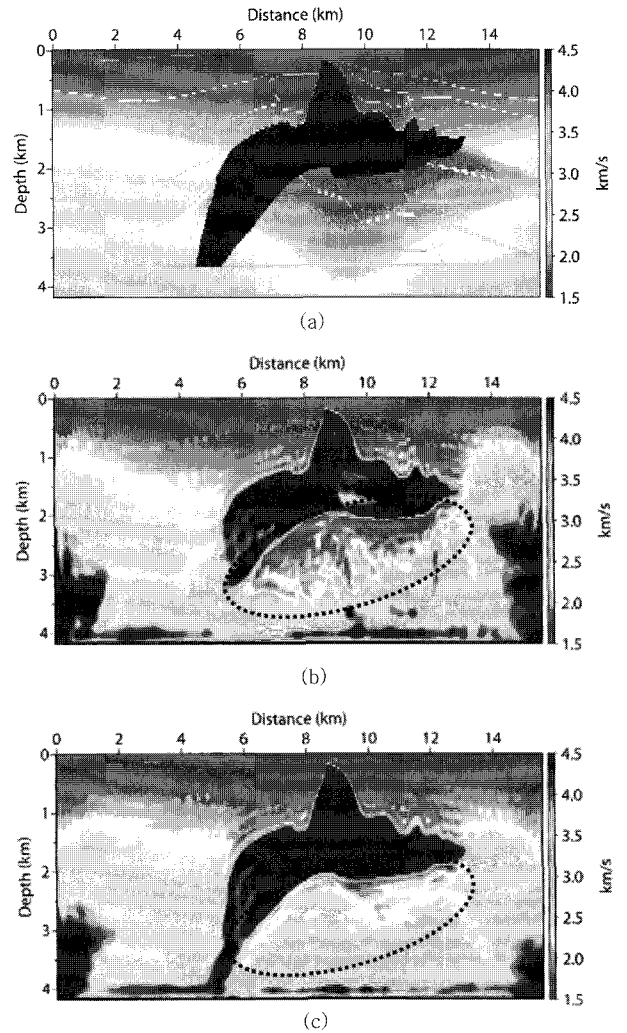


Fig. 7. (a) The SEG/EAGE salt model and inverted velocity models obtained by (b) using the residual-selection strategy, and (c) using the conventional gradient-based frequency-domain inversion algorithm.

통상적인 그래디언트 법에 기반한 주파수영역 파형역산을 이용하여 얻은 속도모델이며, 암염구조는 잘 영상화되었으나 주요 암염 하부의 저속도 영역은 명확히 드러나지 않음을 알 수 있다.

잔여파동장 분리 기법의 다양한 지하구조 모델에 대한 효과를 확인하기 위해 Fig. 8(a)에 나타난 Marmousi 모델(Versteeg, 1994)에 대해서도 파형역산을 수행하였다. 파형역산을 위해 원래의 시간영역의 자료로부터 보간법을 이용하여 격자 간격이 25 m인 자료를 생성하였다. 최대 주파수는 12.1 Hz이고, 송신원의 개수는 240개이다. 각 송신원에 대한 수진기의 개수는 350개이다. 역산을 위한 초기 속도 모델은 심도가 증가함에 따라 속도가 1.5 km/s부터 5.5 km/s까지 선형으로 증가하는 모델을 사용하였다. Fig. 8(b)는 본 논문에서 제안한 파형역산 알고리즘을 이용하여 얻은 역산 결과이고, 모델 심부의 배사구조가 실제모델과 유사한 결과를 보여준다. Fig. 8(c)는 통상적인 주파수영역 파형역산 알고리즘을 이용하여 얻은 결과이며, 모

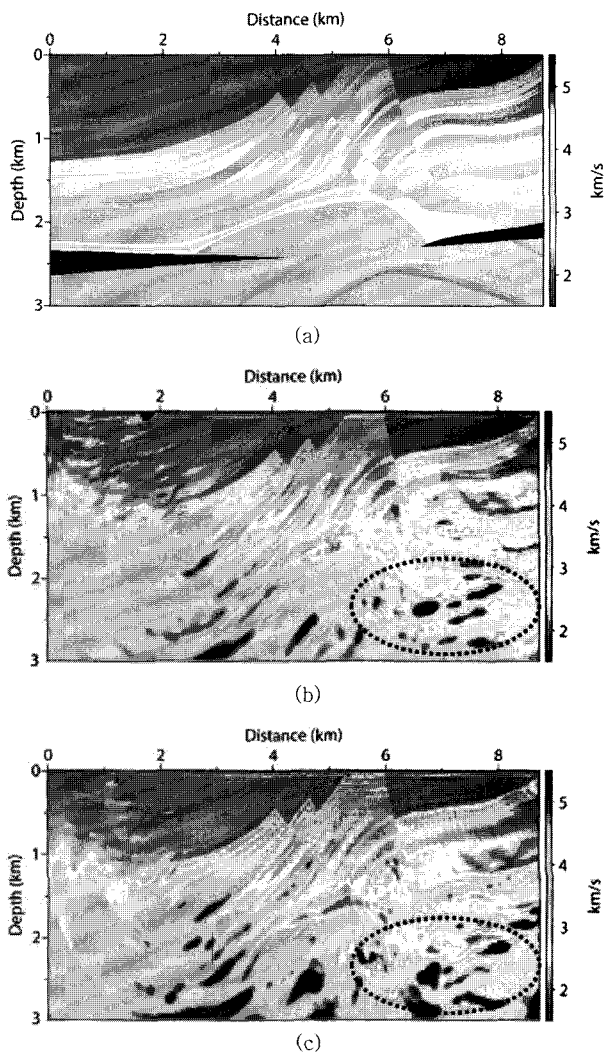


Fig. 8. (a) The Marmousi velocity model and inverted velocity models obtained by (b) using the residual-selection strategy, and (c) using the conventional gradient-based frequency-domain inversion algorithm.

델 상부의 역산 결과는 Fig. 8(b)와 유사하지만 심부에서는 왜곡된 형태의 속도 구조를 보여준다. 특히 다윈으로 표시한 영역을 비교해보면 잔여 파동장 분리 기법의 역산 결과는 통상적인 방법에 비해 배사구조 및 암염구조의 연속성이 향상됨을 알 수 있다. 수치 예제를 통해 잔여 파동장 분리 기법이 모델의 심부구조에 대한 역산 결과를 향상시키는 것을 확인할 수 있다.

결론

본 논문에서는 분리된 시간영역 잔여 파동장을 이용하여 주 파수영역 완전 파형역산을 수행하였다. 진폭 스펙트럼 분석을 통해 분리된 잔여 파동장이 그룹별로 정규화되는 효과가 있음을 확인하였다. 또한, 최종적인 경사방향은 각 그룹별로 정규화된 잔여 파동장들을 이용하여 평균하기 때문에 통상적인 잔

여 파동장에서 작은 값을 가지는 파동장들을 상대적으로 강조하는 효과가 있다. 따라서, 이 분리 기법을 통해 얻어진 경사 방향은 암염 하부 영역의 구조를 정교하게 영상화 할 수 있다. 이러한 잔여파동장 분리기법은 평면파 분해기법이나 입사각 분해기법과 더불어 입력자료의 전처리를 통한 역산 분해능 향상을 기대할 수 있다. 수치 예제를 통해 잔여 파동장 분리 기법은 특히 모델의 심부에 대해 향상된 역산결과를 보여주는 것을 확인하였다. 진폭 크기를 이용한 분해기법의 특성상 잡음 수준에 민감한 반응을 보일 것으로 판단되므로 향후 현장 자료에 대한 적용성 연구가 필요할 것으로 사료된다.

사사

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 2010T100200133).

참고문헌

- Aminzadeh, F., Burkhard, N., Nicoletis, L., Rocca, F., and Wyatt, K., 1994, SEG/EAGE 3-D modeling project: 2nd update, *The Leading Edge*, **13**, 949-952.
- Brenders, A. J., and Pratt, R. G., 2007, Full waveform tomography for lithospheric imaging: Results from a blind test in a realistic crustal model, *Geophys. J. Int.*, **168**, 133-151.
- Brossier, R., Operto, S., and Virieux, J., 2009, Seismic imaging of complex onshore structures by 2D elastic frequency-domain full-waveform inversion, *Geophysics*, **74**, WCC63-WCC76.
- Bunks, C., Saleck, F. M., Zaleski, S., and Chavent, G., 1995, Multiscale seismic waveform inversion, *Geophysics*, **60**, 1457-1473.
- Cruse, E., Pica, A., Noble, M., McDonald, J., and Tarantola, A., 1990, Robust elastic nonlinear waveform inversion: application to real data, *Geophysics*, **55**, 527-538.
- Djikpesse, H. A., and Tarantola, A., 1999, Multiparameter 11 norm waveform fitting: Interpretation of Gulf of Mexico seismograms, *Geophysics*, **64**, 1023-1035.
- Pratt, R. G., Shin, C., and Hicks, G. J., 1998, Gauss-Newton and full Newton methods in frequency-space seismic waveform inversion, *Geophys. J. Int.*, **133**, 341-362.
- Pyun, S., Son, W., and Shin, S., 2009, Frequency-domain waveform inversion using an 11-norm objective function, *Expl. Geophys.*, **40**, 227-232.
- Ravaut, C., Operto, S., Imbrota, L., Virieux, J., Herrero, A., and Dell'Aversana, P., 2004, Multi-scale imaging of complex structures from multifold wide-aperture seismic data by frequency-domain full-wavefield inversions: Application to a thrust belt, *Geophys. J. Int.*, **159**, 1032-1056.
- Shin, C., S. Jang, and Min, D. -J., 2001, Improved amplitude

- preservation for prestack depth migration by inverse scattering theory, *Geophys. Prospect.*, **49**, 592-606.
- Shin, C., Pyun, S., and Bednar, J. B., 2007, Comparison of waveform inversion, part 1: conventional wavefield vs logarithmic wavefield, *Geophys. Prospect.*, **55**, 449-464.
- Sirgue, L., and Pratt, R. G., 2003, Waveform inversion under realistic conditions: Mitigation of non-linearity, *73rd Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 694-697.
- Tarantola, A., 1984, Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation, *Geophysics*, **49**, 1259-1266.
- Versteeg, R., 1994, The Marmousi experience: Velocity model determination on a synthetic complex data set, *The Leading Edge*, **13**, 927-936.